第41卷 第11期
2024年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 11
Nov. 2024

河套灌区农田地下水化学特征与不同地类水盐迁移

侯 聪[1,2]， 史海滨[1,2]， 苗庆丰[1,2]， 胡智远[1,2]， 赵 毅[1,2]，
于翠翠[1,2]， 闫 妍[1,2]， 范理权[1,2]， 张 涛[3]

（1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 高效节水技术装备与水土环境效应内蒙古工程研究中心，内蒙古 呼和浩特 0100181；3. 呼和浩特水文水资源分中心，内蒙古 呼和浩特 010020）

摘 要：为确定深度节水背景下河套灌区农田地下水的化学特征与不同类型农田间的水盐迁移转化关系，选取河套灌区典型灌溉农田作为试验区，利用经典统计学、主成分分析与溶质动力学原理，分析典型灌溉农田浅层地下水离子与浅层地下水埋深变化特征，确定影响地下水水质的主要地下水特征因子；讨论作物种植前后土壤离子变化情况；运用定位通量法确定了地下水对不同类型农田间盐分的贡献，并建立水盐均衡模型。结果表明：(1) 浅层地下水阳离子以Na^++K^+为主，占阳离子总量的53.22%，阴离子以SO_4^{2-}为主，占阴离子总量的41.04%，地下水主要化学类型为HCO_3·SO_4–Na型，通过主成分分析得出影响地下水水质的主要特征因子为TDS、Na^++K^+、HCO_3^-、SO_4^{2-}。(2) 作物种植前后盐分积聚以NaCl和Na_2SO_4为主。(3) 不同类型田块的蒸散量不同，荒地、葵花地、玉米地的ET分别为422.6 mm、475.6 mm、625.8 mm。(4) 玉米、葵花、荒地土壤均处于积盐状态，通过水平渗透进入荒地的盐分为1924 kg·hm^{-2}，占荒地积盐量的22.00%。(5) 荒地与耕地存在盐分过渡带，荒地附近推荐种植葵花等耐盐性较好经济作物。研究可以为当地水资源高效利用、土壤盐渍化调控和农业可持续发展提供指导意义。

关键词：荒地；土壤盐分；地下水补给量；盐离子；地下水埋深；干排盐；河套灌区

河套灌区是我国重要的商品粮油生产基地[1]，盐碱化耕地面积约为39×10^4 hm^2，占总耕地面69%[2]，土壤盐渍化始终制约着灌区的可持续发展[3]。地下水作为盐分运移的载体，与土壤水盐运移关系密切[4]，过高的地下水位与强烈的蒸发使河套灌区土壤盐渍化程度不断加剧。河套灌区中光能丰富，农作物种类多、品质高，灌区内部种植结构复杂[5]，主要种植有玉米、葵花、小麦、瓜类，荒地作为其中特殊的存在，普遍在灌区农田中呈插花状、零星状出现，是承载盐分的重要区域，而地下水作为盐分传递的纽带，对灌区水盐平衡起着重要作用，揭示地下水与土壤的水盐迁移及转化关系，可以对灌区土壤盐渍化的防治与地下水的利用提供技术支撑。

许多学者对土壤–地下水的关系与水盐迁移展开了大量研究，取得了丰富的研究成果。徐英等[6]利用指示Kriging法对解放闸灌域的地下水位埋深与土壤表层含盐量的空间分布规律分析表明，土壤表层发生中度盐渍化时，地下水埋深为2 m，发生轻度盐渍化时，地下水埋深为2.5 m。Fan等[7]利用遥感数据与空间模型结合，将地下水水位、地下水TDS与土壤盐分进行对比，认为黄河三角洲土地盐渍化与浅层地下水位和地下水TDS的增加密切相关。张文聪等[8]利用水量平衡法分析了河套灌区典型区土壤水与地下水的转化关系，灌溉期土壤水补给地下水、2 a生育期内土壤水补给地下水分别为207.73 mm、236.94 mm，非灌溉期地下水通过毛管上升作用补给土壤水。孔繁瑞等[9]设置了不同地下水埋深下的土柱试验，发现地下水埋深越浅水分利用效率越高，但会存在返盐现象。王国帅等[10]利用土壤水动力学与溶质动力学方法，对耕地–荒地–海子系统建立了水盐平衡模型，发现地下水的运移方向为耕地向荒地向海子。袁成福[11]利用并验证了Modflow模型，估算了耕地地下水运移至盐荒地的水量，进而估算出耕地地下水迁移给荒地的盐量。

收稿日期：2024-06-07； **修订日期：**2024-08-04
基金项目：内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目(2023JBGS0003)；国家重点研发计划(2021YFC3201202-05)；国家自然科学基金项目(52269014)
作者简介：侯聪(2000-)，男，硕士研究生，主要从事干旱区农业水文过程研究. E-mail: 2531741700@qq.com
通讯作者：史海滨. E-mail: shi_haibin@sohu.com

任东阳等[12]提出一种"上升下降法",利用地下水埋深的变化与给水度,进一步建立水盐平衡方程,估算出水分、盐分进入农田的重分配过程。

近年来,随着节水改造工程与深度节水政策的实施,引黄水量的不断减少,生育期灌溉用水量与秋浇/春汇水量均发生了较大变化,影响了灌区原有的水盐平衡体系[13],深度节水背景下地下水的化学变化特征与不同类型农田间的盐分迁移及转化关系有待进一步研究。本研究在此背景下选取河套灌区典型的玉米-葵花-荒地插花状种植农田,研究了其地下水年内化学变化特征;分析种植前后各地类的离子变化;建立不同田块间的水盐均衡模型,探讨荒地的干排盐作用。研究结果可为河套灌区浅层地下水利用、土壤盐渍化防治提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验区位于内蒙古河套灌区义长灌域左二支渠下的典型灌溉农田(108°21′N,41°7′E,海拔1020 m),试验区位置如图1所示。试验区东西宽约390 m,南北宽350 m,总土地面积约12.67 hm²。试验区具有中温带干旱、半干旱大陆性气候特点,气温变化大,日较差显著,光照充足导致蒸发较强,年蒸发量2240 mm,而降水较少,年降水量56.3~235.4 mm,多集中在6—8月,年平均气温7.5 ℃(图2)。地下水埋深全年在0.3~3.6 m变化,土壤pH值为7.8~9.3。试验区内主要有耕地、盐荒地两种土地利用类型,大部分为耕地,其主要作物为葵花、玉米、小麦,主要灌溉方式为畦灌。试验时间为2023年4—10月;试验区共布设7眼地下水观测井,布设3组负压计、3个土壤微型蒸发器,其水盐运移依据水盐平衡原理(图3);气象数据来源中国气象科学数据共享网(http://data.cma.cn/)。

1.2　试验设计与数据采集

1.2.1　土壤基本物理性质　在试验区3种土地类型上分别布设垂直剖面采用环刀法进行土壤物理性质测试,采集土壤1 m深的土样,分6层取样,取样

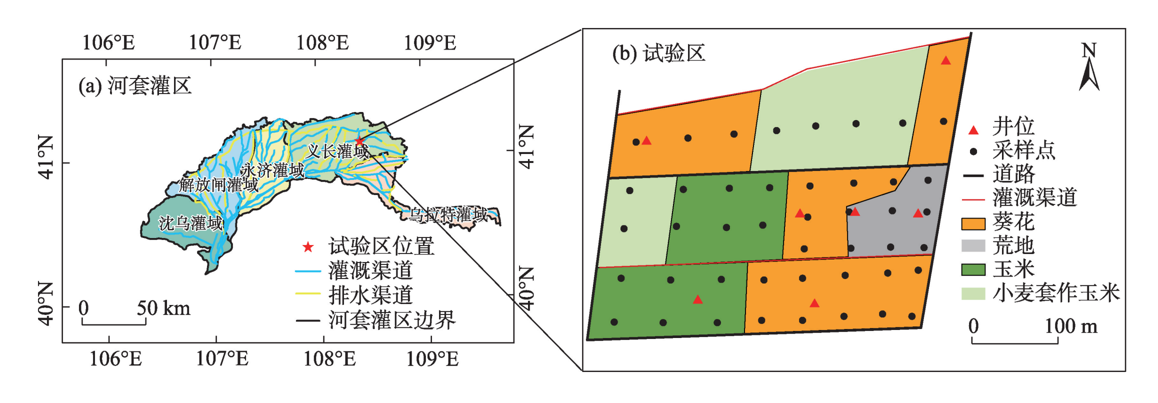


图1　试验区位置

Fig. 1　Location of the experimental area

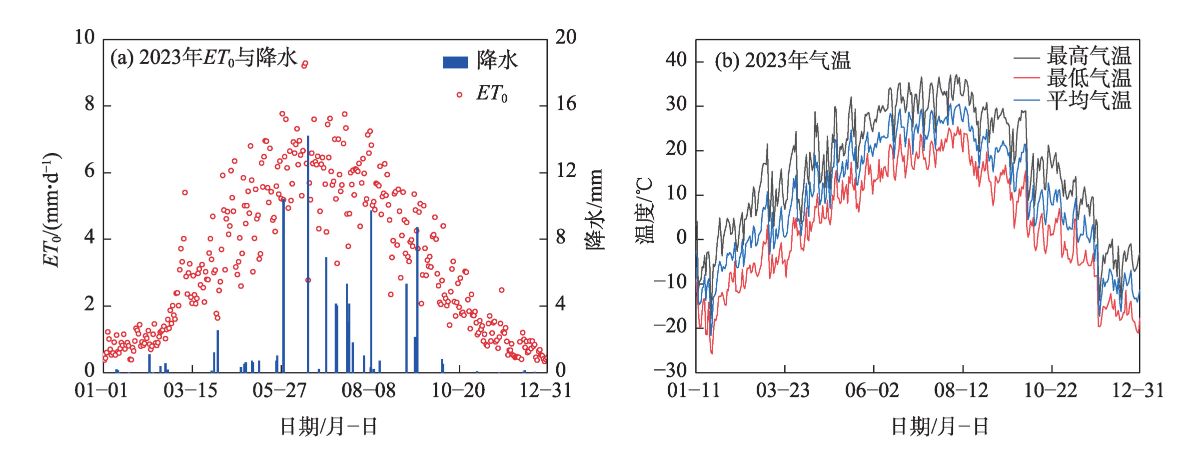


图2　试验区2023年气象状况

Fig. 2　Meteorological conditions of experimental area in 2023

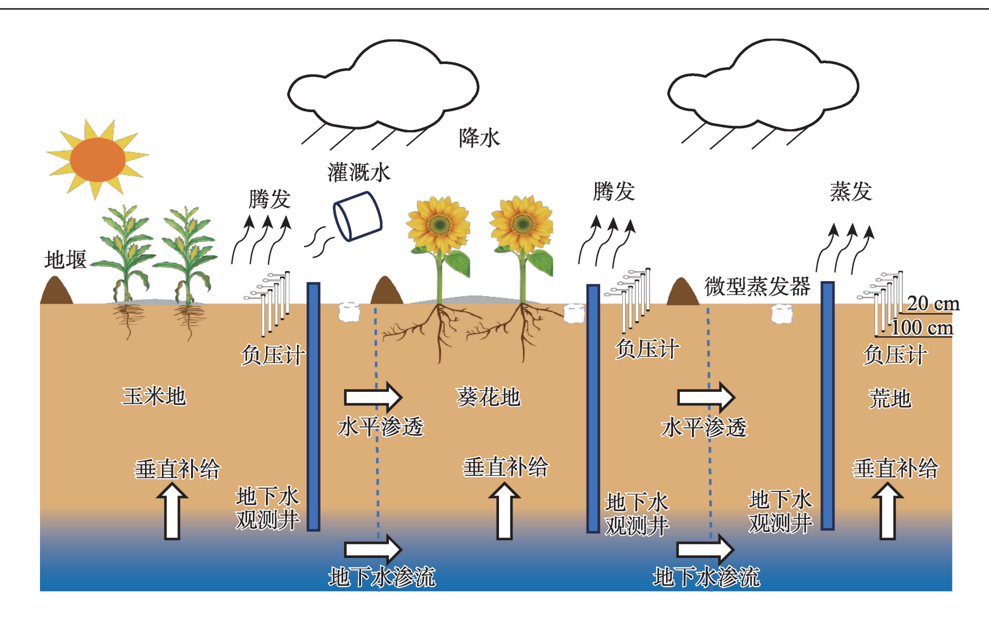


图3 试验设计剖面及水盐运移原理

Fig. 3 Experimental design section and water salt migration principle

深度为0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm,每层进行3次重复,取平均值,试验区各层土壤物理性质如表1所示。

1.2.2 土壤监测 根据网格法确定以50 m×50 m的距离均匀布设采样点,共计40个采样点,采用土钻法采集土壤1 m深的土样,共分6层取样,取样深度同1.2.1节。每隔15~20 d采集土样,灌水前后加密取样,取样时一部分装入铝盒,一部分装入密封袋中。用烘干法测定土壤含水率,土样经风干、研磨后过2 mm筛土水质量比为1:5的土壤浸提液,利用电导率仪(DDS-307A,Shang hai,China)测定土壤电导率。

1.2.3 地下水监测 重点观测井安装地下水位计(DATA-6216,Beijing,China),每2 h记录1次地下

表1 试验区土壤物理性质

Tab. 1 Soil physical properties in experimental area

土地类型	土层深度/cm	砂粒/%	黏粒/%	粉粒/%	土壤类型	土壤容重/(g·cm^{-3})	田间持水率/%	饱和含水率/%
葵花	0~10	0.32	0.06	0.62	粉砂壤土	1.6	28.66	34.37
	10~20	0.18	0.1	0.72	粉砂壤土	1.54	27.67	36.16
	20~40	0.29	0.07	0.64	粉砂壤土	1.51	26.72	32.92
	40~60	0.03	0.16	0.81	粉砂壤土	1.5	29.23	34.13
	60~80	0.06	0.16	0.78	粉砂壤土	1.5	32.72	37.92
	80~100	0.3	0.06	0.64	粉砂壤土	1.47	33.27	40.36
玉米	0~10	0.23	0.06	0.7	粉砂壤土	1.58	27.17	32.63
	10~20	0.18	0.08	0.74	粉砂壤土	1.52	29.72	33.79
	20~40	0.18	0.06	0.76	粉砂壤土	1.47	31.11	35.53
	40~60	0.17	0.04	0.79	粉砂壤土	1.48	31.32	35.64
	60~80	0.36	0.03	0.61	粉砂壤土	1.51	36.07	40.73
	80~100	0.17	0.05	0.78	粉砂壤土	1.49	33.06	38.91
荒地	0~10	0.19	0.05	0.76	粉砂壤土	1.67	31.87	39.29
	10~20	0.2	0.05	0.75	粉砂壤土	1.49	28.48	34.49
	20~40	0.1	0.04	0.85	粉土	1.48	27.89	33.57
	40~60	0.08	0.05	0.88	粉土	1.45	33.33	39.33
	60~80	0.07	0.06	0.87	粉土	1.56	30.28	36.46
	80~100	0.05	0.07	0.87	粉土	1.51	31.37	39.07

水位。地下水观测井每7~10 d测量1次地下水埋深。每隔10~15 d取水样封装在500 mL聚乙烯瓶中密封,每次收集3次重复,24 h内带回实验室测定地下水EC、pH、CO_3^{2-}、HCO_3^-、Na^++K^+、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-},其中pH采用玻璃电极法测定,Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}采用EDTA滴定法测定,CO_3^{2-}、HCO_3^-采用酸滴定法测定,Cl^-采用硝酸银滴定法测定,Na^++K^+利用阴阳离子平衡确定。

1.2.4 水土势观测　在葵花地、玉米地和荒地分别安装1组负压计,安装深度分别为20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm,每2~3 d观测1次数据。

1.2.5 灌溉水和水质　用便携式流速仪测定灌溉水量,并收集灌溉水封装在500 mL聚乙烯瓶中密封,每次取3次重复,利用电导率仪(DDS-307A,Shanghai,China)测定电导率,灌溉情况和灌溉水化学性质详见表2和表3。

表2　2023年试验区灌溉情况

Tab. 2　Irrigation system in the 2023 experimental area

作物	灌溉事件	灌溉日期	灌水定额/mm	灌溉总额/mm
向日葵	第1水	5月18日	150	150
玉米	第2水	6月27日	110	390
	第3水	7月17日	150	
	第4水	8月5日	130	

1.3 研究方法

1.3.1 土壤电导率转换为土壤全盐量　计算公式如下[14]:

$$C = 3.7657EC_{1:5} - 0.2405 \tag{1}$$

式中:C为土壤全盐量(g·kg^{-1});$EC_{1:5}$为土水比1:5土壤浸提液电导率(dS·m^{-1})。

1.3.2 土壤含盐量　计算公式如下:

$$S = 100C\rho_s l \tag{2}$$

式中:S为土壤含盐量(kg·hm^{-2});ρ_s为土壤容重(g·cm^{-3});l为土壤深度(cm)。

1.3.3 地下水补给量　采用定位通量法[15]计算试验区地下水补给渗漏量。在某一特定位置设置好定位点,然后在其上(Z1)和下(Z2)处安装负压计,测定土水势,计算两个边界面水力梯度。结合达西定律计算出根系层下边界土壤水分通量,计算公式如下:

$$q = -K\left(\bar{h}\right)\left(\frac{h_2 - h_1}{\Delta Z} + 1\right) \tag{3}$$

其中

$$\bar{h} = \frac{h_2 - h_1}{2} \tag{4}$$

$$K\left(h\right) = K_s\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta}\right)^{\lambda}\left\{1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta}\right)^{\frac{1}{m}}\right]^{m}\right\}^{2} \tag{5}$$

其中

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + \left|\alpha h\right|^{n}\right)^{\frac{n-1}{n}}} \tag{6}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \tag{7}$$

式中:q为某观测时段T内土壤水通量(cm·d^{-1});h_1、h_2为断面$Z1$和$Z2$处的土水势(kPa);ΔZ为Z_1和Z_2的差值(cm·d^{-1});K(h)为非饱和导水率(cm·d^{-1});θ为土壤体积含水率(cm^3·cm^{-3});θ_s为土壤饱和含水率(cm^3·cm^{-3});θ_r为土壤残余含水率(cm^3·cm^{-3});α、n、m、λ为经验参数;K_s为饱和导水率(cm·d^{-1});h为土壤基质势(kPa)。

某研究时段T内土体水流量$Q(T)$:

$$Q\left(T\right) = \int_0^T q\left(t\right)\mathrm{d}t \tag{8}$$

式中:T为作物生长周期(d)。

1.3.4 地下水补给盐量　计算公式如下[16]:

$$S_b = \frac{10N_d\overline{T_{DS}}\sum_{i=1}^{n}\overline{Q_i}(z)}{\varphi} \tag{9}$$

式中:S_b为地下水补给土壤盐量(kg·hm^{-2});N_d为计算时长(d);n为土壤层数;$\overline{Q_i}(z)$为第i层土壤地下水补给量(mm·d^{-1});$\overline{T_{DS}}$为地下水平均矿化度(g·L^{-1});φ为土壤孔隙度,取0.47。

1.3.5 地下水电导率和地下水矿化度转换[10]

$$T_{DS} = 0.69EC_w \tag{10}$$

式中:T_{DS}为地下水矿化度(g·L^{-1});EC_w为地下水电

表3　试验区灌溉水化学性质

Tab. 3　Chemical properties of irrigation water in experimental area

EC /(dS·m^{-1})	pH	CO_3^{2-} /(mg·L^{-1})	HCO_3^- /(mg·L^{-1})	Cl^- /(mg·L^{-1})	Ca^{2+}/(mg·L^{-1})	Mg^{2+} /(mg·L^{-1})	SO_4^{2-} /(mg·L^{-1})	Na^++K^+ /(mg·L^{-1})
0.95	7.52	36	85	160	60	48	407	200

导率($dS\cdot m^{-1}$)。

1.3.6 耕地水平渗透盐量 根据盐分平衡理论，耕地水平渗透给荒地的盐量计算：

$$S_l = S_i - S_{i-1} - S_{ib} \tag{11}$$

式中：S_l 为耕地水平渗透给荒地盐量($kg\cdot hm^{-2}$)；S_i 为第i时期荒地储盐量($kg\cdot hm^{-2}$)；S_{i-1} 为第i−1时期荒地储盐量($kg\cdot hm^{-2}$)；S_{ib} 为第i−1~i时期地下水补给荒地的盐量($kg\cdot hm^{-2}$)。

1.3.7 土壤积盐率计算 土壤积盐率为0~100 cm土壤剖面某一时期与其前一时期相比土壤含盐量的增加率，计算式为：

$$\Delta S_i = \frac{S_i - S_{i-1}}{S_i} \times 100\% \tag{12}$$

式中：ΔS_i 为土壤积盐率(%)；S_i 为第i时期土壤全盐量($g\cdot kg^{-1}$)；S_{i-1} 为第i−1时期土壤全盐量($g\cdot kg^{-1}$)。

1.3.8 土壤储水量

$$W_i = 10\sum_{i=1}^{n} \gamma_i h_i \theta_i \tag{13}$$

式中：W_i 为第i层土壤储水量(mm)；γ_i为第i层土壤的容重($g\cdot cm^{-3}$)；h_i为第i层土壤的厚度(cm)；θ_i 为第i层土壤的质量含水率($g\cdot g^{-1}$)。

1.3.9 水量平衡

$$ET = P + F + G + I - D - \Delta W \tag{14}$$

式中：ET为腾发量(mm)；P为降雨量(mm)；F为水平渗入量(mm)；G为地下水补给量(mm)；I为灌溉水量(mm)；D为渗漏量(mm)；ΔW 为土壤储水量的变化量(mm)。

2 结果与分析

2.1 地下水化学分析及埋深变化

2.1.1 地下水盐离子统计特征 对分布于试验区7眼观测井4—9月60个潜水水样的化学参数进行分析，由不同时期地下水指标可知(表4)。pH变化范围在7.80~8.56，整个监测期间，绝大部分地下水呈弱碱性。变异系数均小于0.1，属于弱变异性，说明试验区地下水酸碱性空间分布均匀，主要原因是由于土壤本身具有缓冲能力，不易受灌溉和施肥等外界活动影响。试验区TDS变化范围为1021~3057 $mg\cdot L^{-1}$，均值为1372 $mg\cdot L^{-1}$，整个观测期地下水以微咸水为主。地下水阴离子以SO_4^{2-}为主(图4a)，平均占阴离子组成部分的41.04%，HCO_3^-、Cl^-次之，分别占31.47%、25.08%，CO_3^{2-}含量最少，仅占2.41%，地下水阳离子以Na^++K^+为主，平均占阳离子组成部分的53.22%，Ca^{2+}、Mg^{2+}次之，分别占28.56%、18.22%。从生育期试验区地下水的变异系数来看，各离子都处于中等变异性，其中，HCO_3^-相比其他离子，在试验区受灌溉、降水等因素的影响较大，同时会受到地下水中Ca^{2+}与Mg^{2+}的制约[17]。CO_3^{2-}虽然变异系数较大，但含量占比较小，个别水样中检测不到CO_3^{2-}，对地下水化学变化影响不大。观测期灌区典型灌溉农田地下水阳离子主要集中在Na^+端，阴离子多数分布在SO_4^{2-}与HCO_3^-端，少数分布在Cl^-端，根据其离子毫克当量计算判断出试验区水化学类型主要为$HCO_3\cdot SO_4$−Na型(图4b)。

2.1.2 地下水盐离子主成分 利用主成分分析的方法来分析影响试验区地下水的主要积盐特征因子，选取地下水中的CO_3^{2-}、HCO_3^-、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、Na^++K^+、TDS作为主要参数，根据特征值大于1进行提取，共提取出3个主成分，可以反映出地下水8种特征参数中76.71%的信息(表5)，其主成分线性表达式如下所示：

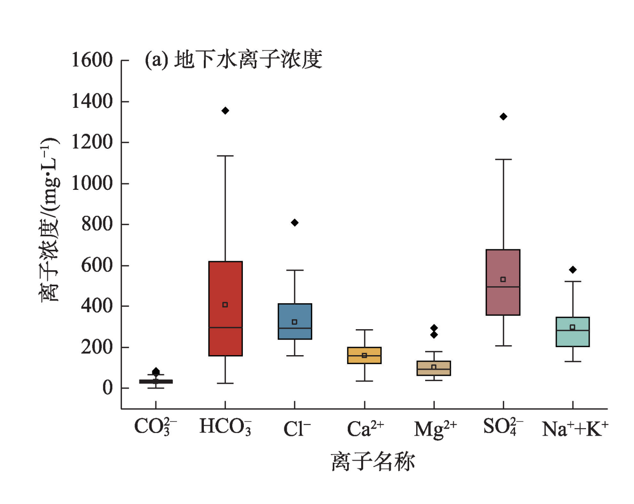
PCA1=0.164(CO_3^{2-})+0.466(HCO_3^-)+0.284(Cl^-)−0.074(Ca^{2+})−0.073(Mg^{2+})+0.419(SO_4^{2-})+0.474(Na^++K^+)+0.513(TDS)

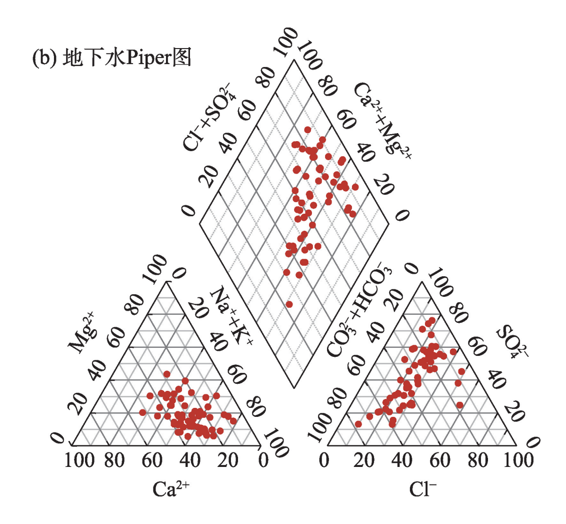
PCA2=−0.136(CO_3^{2-})−0.222(HCO_3^-)+0.240(Cl^-)+0.606(Ca^{2+})−0.649(Mg^{2+})+0.070(SO_4^{2-})−0.051(Na^++K^+)+0.280(TDS)

表4 不同时期地下水监测指标

Tab. 4 Indicators for groundwater monitoring over time

测定指标	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	Na^++K^+	TDS	pH
最小值/($mg\cdot L^{-1}$)	0	24	160	36	39	208	130	1021	7.80
最大值/($mg\cdot L^{-1}$)	84	1355	808	285	314	1328	579	3057	8.56
平均值/($mg\cdot L^{-1}$)	31	407	324	160	102	531	298	1372	7.97
标准差/($mg\cdot L^{-1}$)	19	313	118	57	52	227	111	356	0.36
变异系数/%	0.61	0.77	0.37	0.36	0.51	0.43	0.37	0.26	0.04





注:箱线图上下边缘为最大值与最小值,矩形盒上下两边位置为上下四分位数,盒内方块为平均值,盒内直线代表中位数,上端菱形点为异常值。

图4　地下水离子箱线图与Piper图

Fig. 4　Groundwater ion Boxplot and Piper plot

表5　地下水盐离子主成分分析的特征值与方差贡献率

Tab. 5　Eigenvalues and variance contributions from principal component analysis of groundwater salt ions

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
PCA1	3.08	38.50	38.50
PCA2	2.01	25.17	63.67
PCA3	1.04	13.04	76.71

$PCA3=-0.756(CO_3^{2-})+0.115(HCO_3^-)+0.435(Cl^-)+0.130(Ca^{2+})-0.075(Mg^{2+})-0.251(SO_4^{2-})-0.375(Na^++K^+)-0.025(TDS)$

其中,TDS、Na^++K^+、HCO_3^-、SO_4^{2-}在第一主成分PCA1上荷载较大,代表了地下水8个参数中4个参数的信息,说明影响地下水盐分的主要为Na_2SO_4和$NaHCO_3$。第二主成分中Ca^{2+}、Mg^{2+}在第二主成分PCA2上占据较高荷载,试验区地下水pH在7.8~8.56左右,且TDS大于600 mg·L⁻¹,Ca^{2+}与HCO_3^-发生反应,生成沉淀,随着碱度的升高会促使Mg^{2+}生成白云石$CaMg(CO_3)_2$沉淀,说明第二主成分主要反应了Ca^{2+}、Mg^2通过影响碳酸盐矿物的溶解进一步影响着地下水的盐分变化[18-19];第三主成分PCA3中CO_3^{2-}有着较高的荷载,其含量较小,多数来自HCO_3^-的水解,作为影响试验区地下水盐分的补充因子。因此,根据其在主成分上的荷载大小,将试验区地下水中TDS、Na^++K^+、HCO_3^-、SO_4^{2-}作为代表研究地下水盐分状况的特征因子。

2.1.3　浅层地下水埋深变化　由图5可以看出,整个试验区内不同土地类型的浅层地下水埋深有着相同的变化趋势,其中荒地浅层地下水埋深变化趋势也同其他土地类型地下水观测井相同。说明在农田尺度中,浅层地下水含水层基本一致,即便处于不同的农田,玉米与葵花的灌溉情况不同(表2),但每当农田灌溉时,浅层地下水位上升及侧向流动迅速,整个灌溉农田浅层地下水位都会同步上升,各地块间浅层地下水水平交换较为充分,浅层地下水埋深动态与农田灌溉有积极的响应关系。第一次灌溉为葵花播种前春汇,灌溉后葵花地浅层地下水水位迅速上升,上升了0.73 m,而其他地块水位上升幅度相比与葵花地较小。随着生育期的延续,玉米与葵花的腾发作用不断增强,浅层地下水不断向上补给导致水位不断下降,玉米灌水后,对浅层地下水的补充明显,地下水水位呈现出峰值-峰谷的交替变化。到生育期末,由于没有灌溉水补给加之降水较少,浅层地下水埋深达到一年内的最大值,平均埋深约为2.8 m。

2.2　不同地类土壤离子变化情况

由作物种植前后试验区不同地类离子变化情况可知(图6),就1 m土体的剖面而言,玉米、葵花各层土壤阴离子以SO_4^{2-}与Cl^-为主,分别占阴离子总量的36.80%、37.89%,荒地各层土壤阴离子以Cl^-为主,占阴离子总量的65.34%;玉米、葵花、荒地3种土地类型的各层土壤阳离子均以Na^++K^+为主,分别占阳离子组成的59.57%、63.08%、82.61%。从时间变化上看,种植前土壤盐分小于秋季,由图6可知,主要的盐分积聚以NaCl和Na_2SO_4为主,其余土壤离

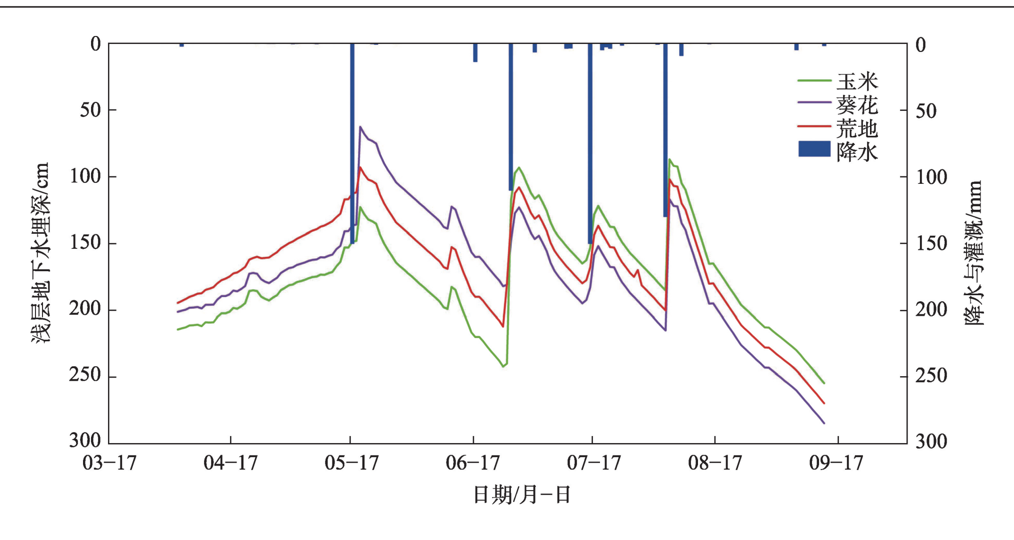


图5 试验区浅层地下水埋深

Fig. 5 Shallow groundwater depth in the experimental area

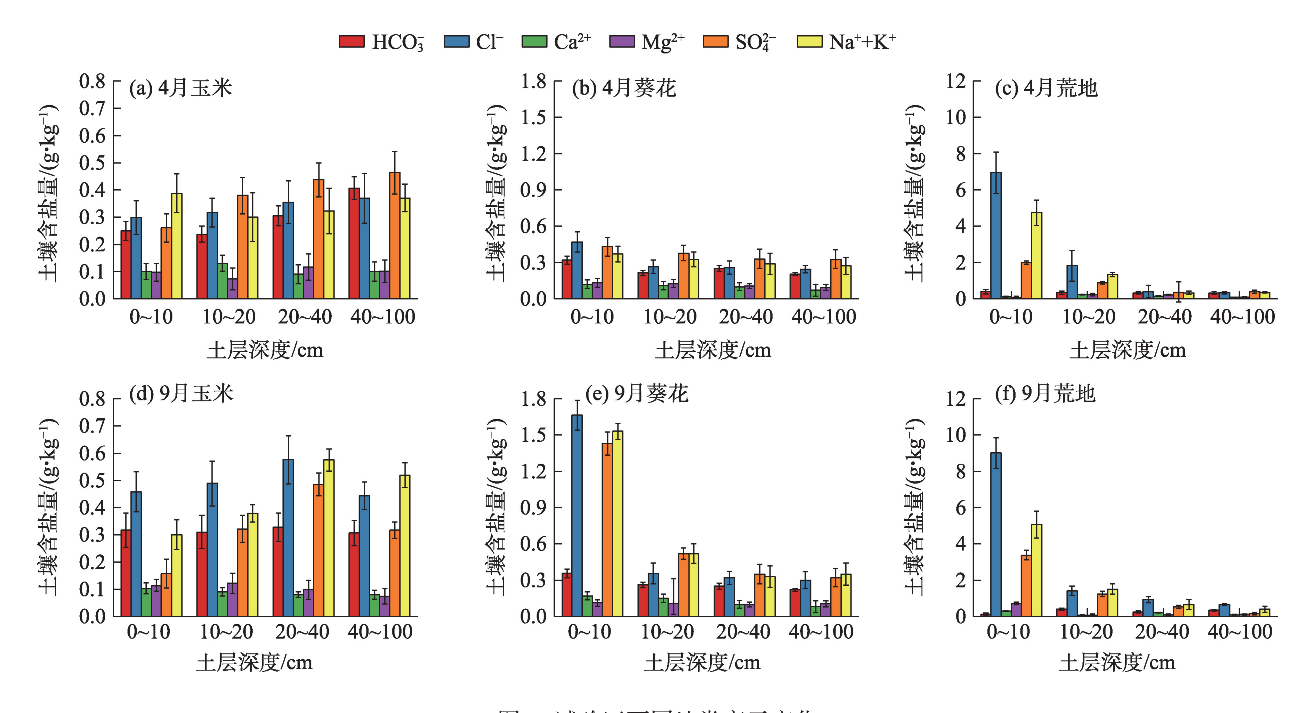


图6 试验区不同地类离子变化

Fig. 6 Changes in ions of different land classes in the experimental area

子变化不大，且土壤盐分主要积聚在表层0~20 cm处，其盐分积累大于中深层。其中荒地表层0~20 cm盐分积累量较大，是其余两种地类的6~9倍，而中深层盐分离子与其余两种地类差别不大。

2.3 不同地类土壤水分平衡

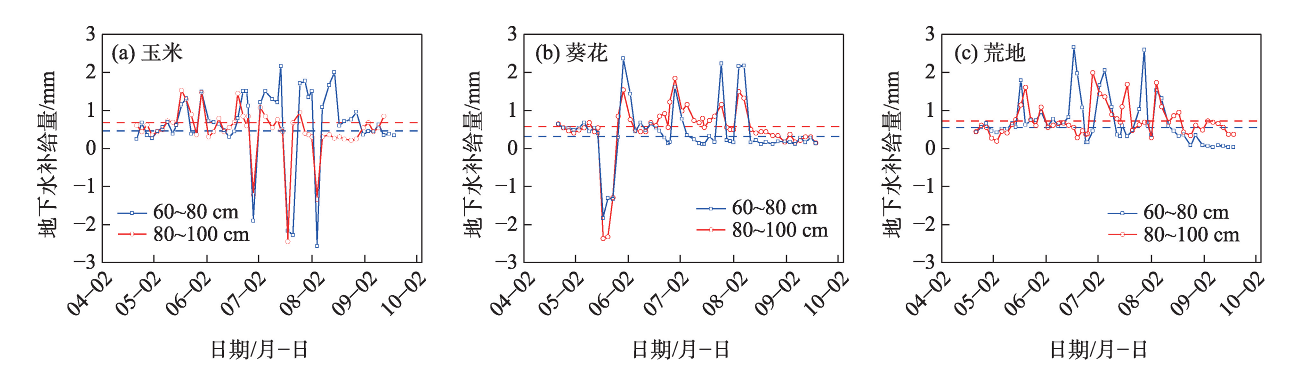
选取整个观测期为计算时段（4月22日至9月15日），共147 d，根据水量平衡法对试验区玉米、葵花、荒地等代表地类计算各地类腾发量（表6）。利用土壤水动力学方法计算出地下水的补给量，由于试验区地下水水位在计算时段内较高，多数时段埋深均大于0.6 m，地下水补给水量多集中在60~100 cm。选取60~100 cm为水分通量观测点。如图7所示，荒地土壤60~100 cm平均地下水补给量分别为0.72 mm·d^{-1}、0.55 mm·d^{-1}，在整个生育阶段，60~100 cm土层中均无渗漏产生，地下水补给量的变化与地下水变化基本一致，玉米、葵花等灌溉区进行灌溉后，抬升的地下水水位补充了深层土壤的水分，使得地下水补给量较大。玉米、葵花等灌溉区变化与荒地类似，葵花地土壤60~100 cm平均地下水补给量分别为0.32 mm·d^{-1}、0.58 mm·d^{-1}，

表6　生育期不同农田水分平衡分析

Tab. 6　Water balance analysis of different cultivated lands during the reproductive period

土地类型	降水量/mm	水平渗入量/mm	地下水补给量/mm	灌溉量/mm	渗漏量/mm	储水变化量/mm	腾发量/mm
荒地	52.9	79.6	186.7	0	0	-103.4	422.6
葵花	52.9	39.3	132.3	150	67.3	-168.4	475.6
玉米	52.9	19.8	167.6	390	152	-147.5	625.8

注:土壤储水量中的负值表示土壤水分消耗>补给。



注:图中虚线代表该土层地下水补给量总体平均值。

图7　不同地类地下水补给量

Fig. 7　Groundwater recharge in different landform

玉米地土壤60~100 cm平均地下水补给量分别为0.68 mm·d^{-1}、0.46 mm·d^{-1}。

根据以上结果估算观测期内葵花地、玉米地和荒地的地下水补给量分别为132.3 mm、167.6 mm和189.7 mm,荒地地下水补给量略大于耕地,原因可能为荒地地势较低,耕地灌溉后抬升地下水位的同时补给荒地深层土壤。由于不同地类作物生长期不同,各地类腾发量存在一定差异,玉米生育周期长且灌水量较大,腾发量较大为625.8 mm;葵花生育期较短且在研究时段内仅灌溉1次,腾发量相比于玉米较小为475.6 mm;而荒地地表无作物覆盖,且地表产生盐结皮现象,抑制了土壤蒸发,腾发量最小为422.6 mm。

2.4　不同地类土壤盐分平衡

各地类不同时期土壤盐分动态如图8所示,春汇阶段(4月22日至5月22日),葵花地进行了灌溉,葵花地土壤1 m土体盐分减少了12776 kg·hm^{-2},土壤脱盐率为50.88%,盐分淋洗效果较好。进入生育期后葵花地无灌溉,盐分逐渐积累,截止到9月15日,盐分增加了20169 kg·hm^{-2}。夏灌阶段(6月10日至8月12日),玉米分别进行了3次灌水,第1次灌溉情况(6月17日至7月4日)与葵花地类似,土壤1 m土体盐分减少了7684 kg·hm^{-2},土壤脱盐率为29.33%,土壤在灌溉后迅速返盐,到第2次灌溉前盐

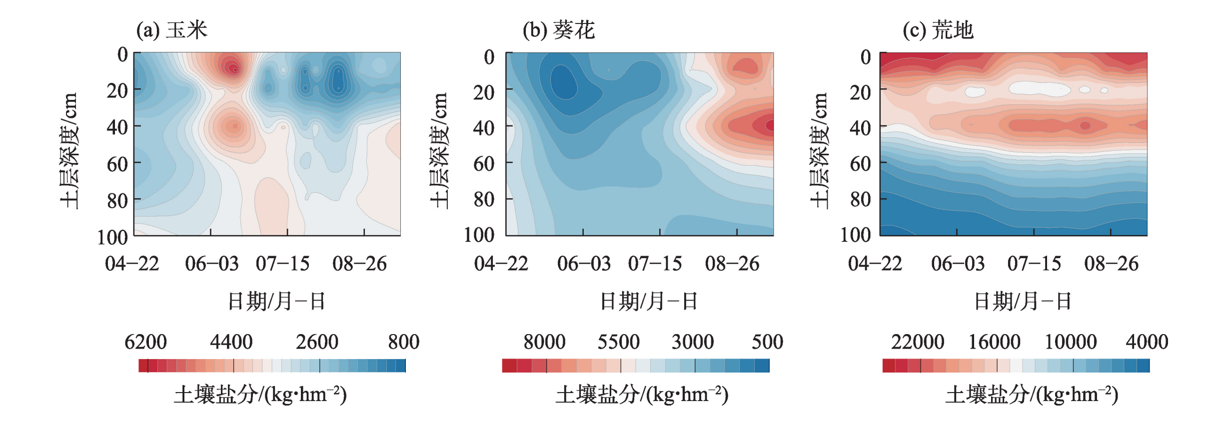


图8　不同地类土壤盐分

Fig. 8　Soil salts of different land types

表7 试验区不同田块盐分平衡分析

Tab. 7 Salinity balance analysis of different fields in the experimental area

土地类型	灌溉引入盐量/(kg·hm^{-2})	水平渗入盐量/(kg·hm^{-2})	地下水补给盐量/(kg·hm^{-2})	盐分总积累量/(kg·hm^{-2})
荒地	0	1924	6825	8749
葵花地	945	1467	4982	7394
玉米地	2457	−2585	4502	4374

分增加了2744 kg·hm^{-2}。第2次、第3次灌溉与其类似，土壤盐分在积盐与脱盐的过程中不断交替，自第3次灌溉结束到观测期末（8月12日至9月15日），玉米积盐率为37.33%。夏灌阶段中玉米的灌溉对荒地盐分无显著的影响，随着气温的升高，土壤水分不断被蒸发，盐分不断在土壤中积聚，荒地1 m土体中均呈现积盐状态，积盐量为4214 kg·hm^{-2}。

由于试验区内未设排水沟，盐分被淋洗进地下水或土壤深层，因此不考虑盐分的排泄项，盐分平衡项如表7所示。荒地、葵花地、玉米地盐分积累量分别为8749 kg·hm^{-2}、7394 kg·hm^{-2}、4374 kg·hm^{-2}。地下水补给盐分是土壤积盐的主要组成部分，经计算地下水对荒地、葵花地、玉米地的地下水盐分向上补给量分别为6825 kg·hm^{-2}、4982 kg·hm^{-2}、4502 kg·hm^{-2}，其中玉米地由于灌溉水量较大，淋洗出部分盐分（即表中水平渗入盐量），盐分通过水平渗透迁移进入了葵花地与荒地，荒地的盐分积累中1924 kg·hm^{-2}来源于附近耕地的水平渗透，占其积盐量的22.00%。

2.5 干排盐过程分析及优化措施

河套灌区中玉米-葵花-荒地插花状种植是典型的种植形式，灌溉事件发生时，由于只针对耕地进行灌溉，且灌溉时间较短（间隔20~25 d）、灌溉水量较大，加之土壤渗透效率高，使得土壤往往未达到田间持水量时就开始产生渗漏。浅层地下水位受到补给开始上升，灌溉区产生的水力梯度促使未灌溉区浅层地下水位抬升，最后使整个区域浅层地下水处于一致，水分从耕地间接流向荒地。而从盐分变化上看，水分并不只是单向从耕地流向荒地，如图9所示，选择试验区玉米-葵花-荒地典型区1 m土壤平均含盐量绘制时空变化图，土壤盐分存在明显的过渡带，荒地附近的耕地土壤盐分含量较大，土壤含盐量大于3.75 g·kg^{-1}，为中度盐渍化土。随着与荒地距离的增加，土壤盐分逐渐减少，含盐量小于2.0 g·kg^{-1}，为轻度盐渍化土壤。产生这种现象的原因可能是在生育期内耕地腾发量大于荒地，促使水分流动方向发生逆转，盐分随之从荒地进入附近耕地，产生盐分过渡带，因此建议荒地附近耕地种植葵花等耐盐性更高的经济作物，减小土壤盐分过高带来的产量降低的问题。此外荒地可以适当种植耐盐的植物，增加腾发量的同时充分发挥荒地干排盐作用。

3 讨 论

目前，针对地下水离子分析多数集中在区域尺度，如李彬等[17]利用图解法、相关性分析等方法分析了节水改造前后河套灌区地下水的化学特征，发现节水改造后，灌区地下水趋向淡化。崔佳琪等[20]进一步利用聚类分析、因子分析的方法分析指出农业灌溉和干旱是水环境趋于盐化的重要原因。本文研究结果与其相似，农田尺度上地下水盐离子受到灌溉的影响较大，灌溉事件发生后，浅层地下水中的Na^{+}+K^{+}离子、Cl^{-}含量明显上升。在灌溉结束后的强烈的蒸发作用下，地下水中盐离子又重新进入土壤中，结合土壤的离子变化情况上看，NaCl与Na_2SO_4是土壤与地下水盐分交换的主要类型。袁宏颖等[21]研究发现渠道衬砌后水化学类型由SO_4·Cl−Mg·Na型逐渐向HCO_3·SO_4−Ca·Mg型变化。与本研究结果不同，本试验区中土壤与地下水中Ca^{2+}、Mg^{2+}含量较少，且整个观测期内含量变化不大。这可能与河套灌区强烈的空间变异性有关，不同地区离子组成上存在一定差异[22]。

近年来，由于河套灌区节水改造工程与深度节水政策的实施，引黄灌溉水量逐步减少，多年以来形成的水盐平衡体系被打破，盐分在灌区内部进行了重分布，荒地、海子这样的特殊地类成为了盐分的排泄区。前人[23]研究表明荒地在强烈的蒸发作用下，盐分向土壤表层聚集。但未给出不同地类的盐分积累差异，本文在此基础上精确描述了不同地类土壤盐分的时间变化规律。曾揭峰等[24]的研究表明，荒地总是灌溉期积累盐分，秋浇期流失盐分，

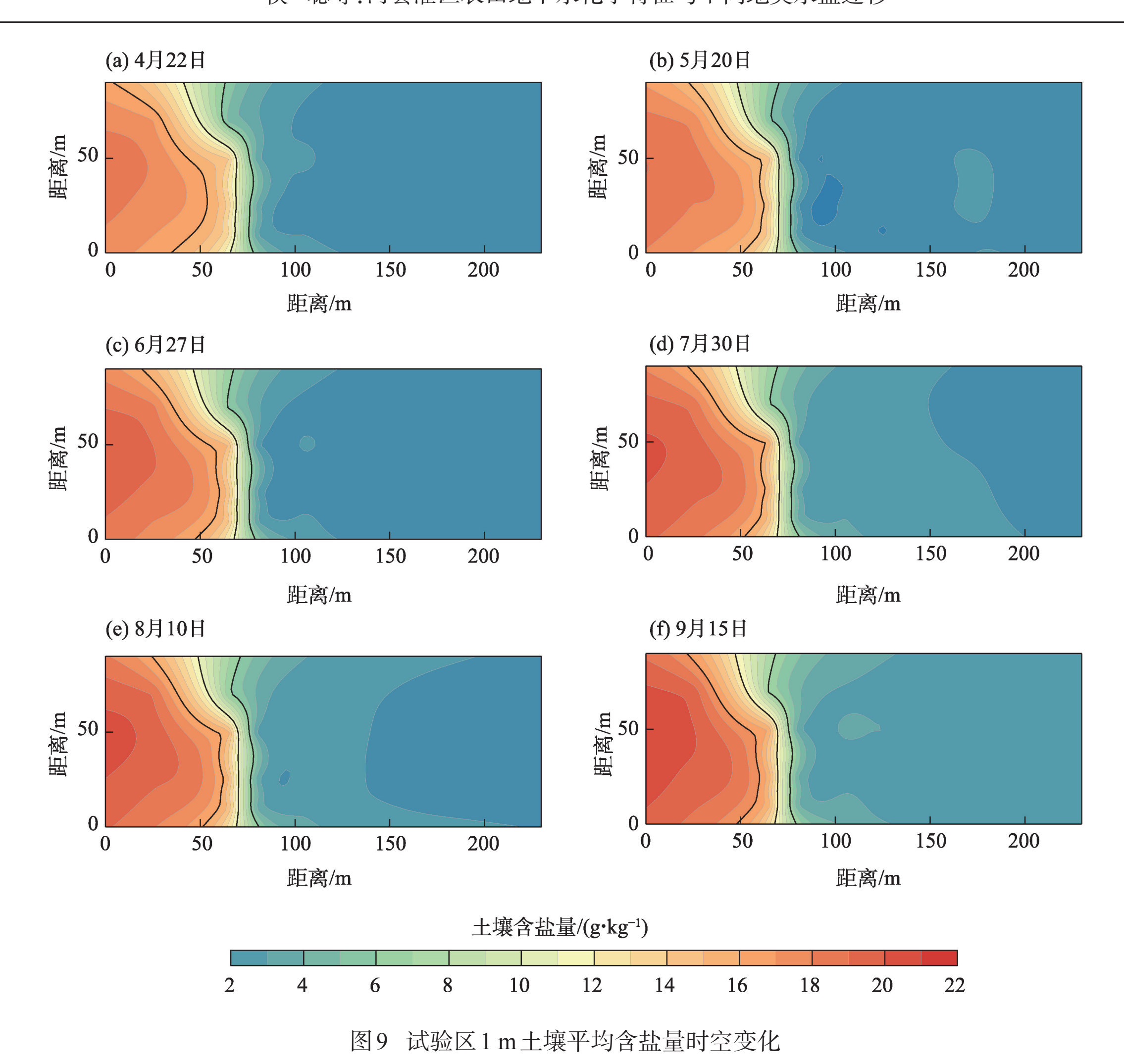


图9　试验区1 m土壤平均含盐量时空变化

Fig. 9　Spatial and temporal variation of 1m average soil salt content in the experimental area

荒地作为"盐库"积累着耕地迁移的盐分。Xiao等[25]利用改进的MODFLOW和MT3DM模型对地下水流动和盐运移进行了模拟,结果表明地下水在支持自然土地植被生长和维持生物多样性方面发挥着至关重要的作用,侧向流动的地下水促使盐分迁移。这与本研究的结果类似,本文利用水量平衡法与溶质动力学方法,分析了灌区中玉米-葵花-荒地典型灌溉农田水盐重分布过程,发现玉米地灌溉会导致浅层地下水位上升,产生水力梯度促使水分流向未灌溉的葵花与荒地,进而带入部分盐分。Liu等[26]研究发现在"潜水蒸发期"蒸腾蒸发可以驱使水和盐从荒地流向农田,从而影响地下水盐度。本研究中从时空变化角度观测不同地类水盐迁移,得出了相似结果,发现在耕地与荒地交接处形成盐分过渡带。综上所述,本文对河套灌区典型农田进行了水盐定位观测研究,分析了浅层地下水的化学特征与不同地类间水盐迁移规律,定量估算了不同地类的水盐变化,并提出了优化措施,为河套灌区水盐调控提供参考依据。

4　结 论

(1) 河套灌区典型灌溉农田系统地下水以微咸水为主。地下水阴离子以SO_4^{2-}为主,平均占阴离子组成部分的41.04%,阳离子以Na^++K^+为主,平均占阳离子组成部分的53.22%,地下水水质类型为$HCO_3\cdot SO_4$-Na型,利用主成分分析将试验区地下水中TDS、Na^++K^+、HCO_3^-、SO_4^{2-}作为代表研究地下水盐分状况的特征因子;浅层地下水位与农田灌溉事件存在积极的响应关系。

(2) 作物种植前后,盐分积聚以NaCl和Na_2SO_4为主,其余土壤盐离子均无显著变化,且积累的土壤盐分均集中在表层0~20 cm。

(3) 对试验区建立了水平衡模型,不同类型农

田的蒸散量不同，荒地、葵花地、玉米地的腾发量分别为422.6 mm、475.6 mm、625.8 mm。

（4）从4月22日至5月15日（147d），试验区中荒地、葵花地、玉米地均处于积盐状态，1 m土体内土壤积盐量荒地>葵花地>玉米地，积盐量分别为14961 kg·hm^{-2}、7394 kg·hm^{-2}、4374 kg·hm^{-2}，耕地水平渗透给荒地的盐分为1924 kg·hm^{-2}，占荒地积盐量的22.00%。

（5）荒地与耕地存在盐分过渡带，荒地附近推荐种植葵花等耐盐性较好经济作物，防止作物因盐分过高造成的大量减产。

参考文献（References）：

[1] Zhang H, Xiong Y, Huang G, et al. Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 205-214.

[2] 孙贯芳, 高照良, 朱焱, 等. 时空克里金评估河套灌区土壤盐分时空格局[J]. 干旱区研究, 2023, 40(2): 182-193. [Sun Guanfang, Gao Zhaoliang, Zhu Yan, et al. Spatio-temporal patterns of soil salinity in Hetao Irrigation District based on spatio-temporal Kriging[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(2): 182-193.]

[3] 苏春利, 纪倩楠, 陶彦臻, 等. 河套灌区西部土壤盐渍化分异特征及其主控因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 916-923. [Su Chunli, Ji Qiannan, Tao Yanzhen, et al. Differentiation characteristics and main influencing factors of soil salinization in the West of Hetao Irrigation Area[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 916-923.]

[4] 马小茗, 李瑞平, 李鑫磊, 等. 河套灌区地下水埋深与土壤盐分对增强型植被指数的联合影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 134-141, 165. [Ma Xiaoming, Li Ruiping, Li Xinlei, et al. Combined effects of groundwater depth and soil salinization on enhanced vegetation index in Hetao Irrigation Area[J]. Arid Zone Agricultural Research, 2023, 41(3): 134-141, 165.]

[5] 牛乾坤, 刘浏, 黄冠华, 等. 基于GEE和机器学习的河套灌区复杂种植结构识别[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 165-174. [Niu Qiankun, Liu Liu, Huang Guanhua, et al. Extraction of complex crop structure in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia using GEE and machine learning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(6): 165-174.]

[6] 徐英, 葛洲, 王娟, 等. 基于指示Kriging法的土壤盐渍化与地下水埋深关系研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 123-130. [Xu Ying, Ge Zhou, Wang Juan, et al. Study on relationship between soil salinization and groundwater table depth based on indicator Kriging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(1): 123-130.]

[7] Fan X, Pedroli B, Liu G, et al. Soil salinity development in the yellow river delta in relation to groundwater dynamics[J]. Land Degradation & Development, 2012, 23(2): 175-189.

[8] 张文聪, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区典型区土壤水-地下水动态与转化关系研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 352-362. [Zhang Wencong, Shi Haibin, Li Xianyue, et al. Dynamic and transformation relationship between soil water and groundwater in typical areas of Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 352-362.]

[9] 孔繁瑞, 屈忠义, 刘雅君, 等. 不同地下水埋深对土壤水、盐及作物生长影响的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(5): 44-48. [Kong Fanrui, Qu Zhongyi, Liu Yajun, et al. Experimental research on the effect of different kinds of groundwater buried depth on soil water salinity and crop growth[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(5): 44- 48.]

[10] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区耕地-荒地-海子系统间不同类型水分运移转化[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 832-842. [Wang Guoshuai, Shi Haibin, Li Xianyue, et al. Study on migration of different types water during farmland-wasteland-lake system in Hetao Irrigation District[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(6): 832-842.]

[11] 袁成福. 西北旱区灌溉条件下土壤水盐动态监测分析与数值模拟[D]. 扬州: 扬州大学, 2022. [Yuan Chengfu. Monitoring Analysis and Numerical Simulation of SoilWater-Salt dynamics under Irrigation Conditions in AridArea of Northwest China[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.]

[12] 任东阳, 徐旭, 黄冠华. 河套灌区典型灌排单元农田耗水机制研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 98-105. [Ren Dongyang, Xu Xu, Huang Guanhua. Irrigation water use in typical irrigation and drainage system of Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(1): 98-105.]

[13] 张倩, 全强, 李健, 等. 河套灌区节水条件下地下水动态变化分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(增刊): 97-101. [Zhang Qian, Quan Qiang, Li Jian, et al. Groundwater dynamic changing under water-saving irrigation conditions of Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(Suppl.): 97-101.]

[14] 童文杰. 河套灌区作物耐盐性评价及种植制度优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. [Tong Wenjie. Study on Salt Tolerance of Crops and Cropping System Optimization in Hetao Irrigation District[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.]

[15] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. [Lei Zhidong. Soil Hydrodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.]

[16] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等 . 河套灌区不同地类盐分迁移估算及与地下水埋深的关系[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 255-269. [Wang Guoshuai, Shi Haibin, Li Xianyue, et al. Estimation of salt transport and relationship with groundwater depth in different

land types in Hetao Irrigation Area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 255-269.]

[17] 李彬, 史海滨, 张建国, 等. 节水改造前后内蒙古河套灌区地下水水化学特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 99-110. [Li Bin, Shi Haibin, Zhang Jianguo, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater before and after water-saving reform in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 99-110.]

[18] 杜丹丹, 白燕英, 袁德亮. 河套灌区地下水化学时空特征及环境驱动因素[J]. 环境科学, 2024, 45(10): 5777-5789. [Du Dandan, Bai Yanying, Yuan Deliang. Chemical spatiotemporal characteristics and environmental driving factors of groundwater in Hetao Irrigation Area[J]. Environmental Science, 2024, 45(10): 5777-5789.]

[19] 房丽晶, 高瑞忠, 贾德彬, 等. 草原流域地下水化学时空特征及环境驱动因素——以内蒙古巴拉格尔河流域为例[J]. 中国环境科学, 2021, 41(5): 2161-2169. [Fang Lijing, Gao Ruizhong, Jia Debin, et al. Spatial-temporal characteristics of groundwater quality and its environmental driving factors of Steppe Basin—Taken Balaguer river basin of Inner Mongolia for instance[J]. China Environmental Science, 2021, 41(5): 2161-2169.]

[20] 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区地下水化学演变特征及形成机制[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4011-4020. [Cui Jiaqi, Li Xianyue, Shi Haibin, et al. Temporal and spatial variation change of groundwater environment in the salinized irrigation districts under the background of water-saving reconstruction[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4011-4020.]

[21] 袁宏颖, 杨树青, 张万锋, 等. 渠道衬砌前后输水对地下水化学特征及土壤盐分含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(10): 41-49. [Yuan Hongying, Yang Shuqing, Zhang Wanfeng, et al. Influence of channel conveyance before and after lining on groundwater chemical characteristics and soil salt contents[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(10): 41-49.]

[22] 窦旭, 史海滨, 李瑞平, 等. 盐渍化土壤剖面盐分与养分分布特征及盐分迁移估算[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 279-290, 330. [Dou Xu, Shi Haibin, Li Ruiping, et al. Distribution characteristics of salinity and nutrients in salinized soil profile and estimation of salt migration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 279-290, 330.]

[23] 李亮, 史海滨, 贾锦凤, 等. 内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 31-35. [Li Liang, Shi Haibin, Jia Jinfeng, et al. Simulation of water and salt transport of uncultivated land in HetaoIrrigation District in InnerMongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 31-35.]

[24] 曾揭峰, 刘霞, 李就好, 等. 基于SWAP模型的耕地-盐荒地-沙丘-海子水盐动态分析[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(6): 540-549. [Zeng Jiefeng, Liu Xia, Li Jiuhao, et al. Dynamic analysis of water and salt in cultivated land-salt wasteland-dunes-Haizi based on SWAP model[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(6): 540-549.]

[25] Xiao X, Xu X, Ren D, et al. Modeling the behavior of shallow groundwater system in sustaining arid agroecosystems with fragmented land use[J]. Agricultural Water Management, 2021, 249: 106811.

[26] Liu G, Wang C, Wang X, et al. Growing season water and salt migration between abandoned lands and adjacent croplands in arid and semi-arid irrigation areas in shallow water table environments [J]. Agricultural Water Management, 2022, 274: 107968.

Chemical characteristics of groundwater and water-salt transport in different land classes in the Hetao Irrigation District

HOU Cong[1,2], SHI Haibin[1,2], MIAO Qingfeng[1,2], HU Zhiyuan[1,2], ZHAO Yi[1,2],
YU Cuicui[1,2], YAN Yan[1,2], FAN Liquan[1,2], ZHANG Tao[3]

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. High Efficiency Water-saving Technology and Equipment and Soil Water Environment Engineering Research Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 3. Hohhot Hydrology and Water Resources Sub-Center, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract: In this study, we aimed to investigate the chemical characteristics of groundwater in farmland within Hetao Irrigation District, focusing on deep water conservation and the relationship between water and salt migration among various types of farmland. Typical irrigated farmland in Hetao Irrigation District was selected as the study area, and an analysis was conducted on shallow groundwater ions and changes in groundwater levels using classical statistics, principal component analysis, and the principle of solute dynamics. The main factors affecting groundwater quality were identified, and the changes in soil ions before and after crop cultivation were examined. Furthermore, the contribution of groundwater to salt accumulation across different types of farmland was quantified, and a water-salt equilibrium model was developed using the locational flux method. The results revealed the following: (1) Shallow groundwater cations were dominated by $Na^{+}+K^{+}$, constituting 53.22% of total cations, while anions were dominated by SO_4^{2-}, making up 41.04% of total anions; thus, the principal chemical type of groundwater was classified as $HCO_3 \cdot SO_4-Na$, with key factors affecting groundwater quality identified as Total Dissolved Solids (TDS), $Na^{+}+K^{+}$, HCO_3^{-}, and SO_4^{2-} through principal component analysis. (2) Salt accumulation before and after crop cultivation was mainly comprised of NaCl and Na_2SO_4. (3) Evapotranspiration (ET) varied across different types of fields, with measurements of 422.6 mm for wasteland, 475.6 mm for sunflower fields, and 625.8 mm for maize fields. (4) Maize, sunflower, and wasteland soils exhibited salt accumulation, with horizontal infiltration contributing 1924 $kg \cdot hm^{-2}$ of salt to wasteland, accounting for 22.00% of total salt accumulation. (5) There is a salt transition zone between wasteland and arable land, indicating the planting of salt-tolerant cash crops, such as sunflower, near wasteland to mitigate crop yield reductions due to high salinity levels. This study offers valuable insights into the efficient use of local water resources, soil salinity management, and sustainable agricultural development.

Keywords: wasteland; soil salinity; groundwater recharge; salt ions; groundwater depth; dry drainage salinity; Hetao Irrigation District